Challenges of water resources planning in the Andes - The case of Quito in Ecuador

POUGET Jean-Christophe*, CALVEZ Roger*, LE GOULVEN Patrick*, LLORET Pablo**, VILLACIS Marcos*

**: IRD Ecuador, Ap. 17.12.857, Quito, Ecuador, tel: (5932) 250 48 56, fax: 250 40 20, UMR G-EAU jcpouget@ird.fr; roger.calvez@ird.fr; patrick.legoulven@ird.fr; UR GREAT ICE villacis@msem.univ-montp2.fr*

***: FONAG, Av. Mariana de Jesús y Carvajal, Sector La Granja, Quito, Ecuador Telefax: 593 (2) 2 433 -847, plloret@fonag.org.ec*

ABSTRACT. AguAndes is a research project designed to promote the integrated water resources management (IWRM) in Andean basins. Within the current political context of the water management reorganization in Ecuador, IWRM on the region of Quito constitute a pilot project characterized by: (a) strong socio-economic growth transforming agricultural lands to urban areas; (b) competition between demands for drinking water and irrigation leading to significant transfers from Amazonian high-altitude watersheds, these resources located in ecologically sensitive areas are conditioned by the glaciers heavily affected by climate change; (c) major water projects planning to increase heavily interbasin transfers in order to cope with increasing demand over the next 50 years. One of the objectives of the project is to co-construct, with different partners, water planning tools that take into account environmental and socio-economic sustainability. These tools have to promote dialogues and consultations among all actors, including that for civil society to be involved in decision making or at least informed.

RÉSUMÉ. AguAndes est un projet de recherche destiné à favoriser la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) dans les bassins andins. Dans le contexte politique actuel de réorganisation de la gestion des eaux en Equateur, la GIRE sur la région de Quito constitue un projet pilote caractérisé par : (a) une forte croissance socio-économique qui transforme l'usage agricole du sol au profit d'une urbanisation galopante ; (b) une concurrence entre les demandes en eau potable et d'irrigation qui a conduit à des transferts importants depuis les bassins d'altitude du versant amazonien, ces ressources se trouvant en zones écologiques sensibles, conditionnées par les glaciers fortement touchés par le changement climatique ; (c) la planification de grands travaux d'aménagement pour augmenter fortement les transferts interbassins afin de faire face à la demande sur les 50 prochaines années. Un des objectifs du projet est de co-construire, avec différents partenaires, des outils d'aide à la planification qui prennent en compte la durabilité environnementale et socio-économique. Ces outils doivent favoriser les dialogues et les concertations entre tous les acteurs, pour que notamment la société civile soit impliquée dans les prises de décision ou pour le moins informée.

KEYWORDS: integrated water resources management, Andes, decision support system, allocation models.

MOTS-CLÉS : gestion intégrée des ressources en eau, Andes, système d'aide à la décision, modèles d'allocation.

INTRODUCTION

La cordillère des Andes, située tout le long de la côte occidentale de l'Amérique du Sud (Figure 1), constitue la plus longue chaîne de montagnes du globe, avec plus de 7000 km et une altitude moyenne de 4000 m. Cette chaîne crée des milieux très différenciés. Ainsi, en Equateur d'une superficie totale de 281 000 km^2, trois régions naturelles sont nettement identifiées d'Ouest en Est :

(1) la "Costa" comprend la frange littorale, dont la longueur diminue à mesure que l'on descend vers le Sud (largeur moyenne de 100 km). Dans ses parties occidentale et nord-occidentale, s'élève une petite cordillère qui ne dépasse pas les 800 mètres d'altitude ;

(2) la "Sierra" est caractérisée par l'imposante barrière montagneuse des Andes dont la largeur oscille entre 100 et 140 km. Dans sa partie nord, on distingue 2 massifs (Cordillères Occidentale et Royale) bien séparés par un couloir interandin d'environ 40 à 50 km de large, et couronnés de volcans voisinant les 6000 mètres d'altitude (Cotopaxi, Chimborazo). C'est dans un de ces bassins inter-andins, à 2850 mètres d'altitude, que se situe Quito (Figure 1) ;

(3) l'"Oriente" est constitué par de grandes vallées alluviales souvent marécageuses, partie prenante du bassin amazonien (Le Goulven & Ruf, 1992).

Le versant pacifique couvre 48% du territoire avec 12 millions d'habitants et une dotation moyenne de 2 000 m^3/hab/an (la dotation critique considérée par l'IWMI est de 1 700 m^3/hab/an, www.iwmi.org) ; le versant amazonien couvre 52% du territoire avec 500 000 habitants et une dotation moyenne de 70 000 m^3/hab/an (CNRH, 2007).

Les bassins andins se caractérisent ainsi par des contrastes très importants sur les ressources et demandes en eau. Les ressources en eau sont abondantes et de très bonne qualité en altitude, où les glaciers (Francou & Vincent, 2007) et les páramos (formations herbacées de haute montagne, caractéristiques des Andes septentrionales, Girard, 2005) jouent un rôle très important de régulation. Mais les totaux pluviométriques peuvent descendre à 300 mm dans le fond des vallées bien abritées. L'irrigation y est indispensable pour sécuriser la récolte et intensifier la production (Le Goulven & Ruf, 1992). L'irrigation est le fruit d'une histoire ancienne, qui a conduit à la superposition de divers types d'aménagements et est marquée par de nombreux conflits. A l'heure actuelle, des cultures d'exportation à hautes valeurs ajoutées côtoient des cultures traditionnelles et de subsistance. Des transferts interbassins traditionnels existaient déjà pour l'irrigation. Ces transferts ont été intensifiés et de grands aménagements sont prévus afin de faire face à la croissance socio-économique. Les études de planification prennent une importance encore plus grande avec le contexte actuel médiatisé du changement climatique. En effet la fonte accélérée des glaciers andins ces dernières décennies est avérée (Francou & Vincent, 2007). Mais l'impact sur les ressources en eau fait l'objet d'expectatives souvent alarmantes (Vergara *et al.* 2007) qui rendent nécessaires l'implication des scientifiques et le renforcement des études et de mesures afin de disposer d'arguments solides et consistants.

Nous allons présenter le cas de la région de Quito, avec son contexte physique, social et institutionnel et son évolution, et les enjeux de la planification des ressources en eau. Nous présenterons certaines études réalisées et les recherches envisagées. Nous conclurons avec l'évocation de ces enjeux sur différents sites des Andes, notamment au Pérou et en Bolivie.

REGION DE QUITO : UN PEU D'HISTOIRE ET EVOLUTION ACTUELLE

Histoire du site

La zone occupée aujourd'hui par la ville de Quito est peuplée depuis au moins 900 ans avant JC. À l'époque pré-incaïque, le site de Quito avait déjà une grande importance, en raison de sa situation stratégique. Il était en effet situé au confluent de plusieurs routes d'échanges entre les différentes populations de la zone, et fut donc le lieu d'intenses échanges commerciaux. En 1487, ce site fut annexé par les Incas et devint le lieu de résidence habituel de l'empereur.

La ville actuelle de Quito fut fondée officiellement par le conquistador espagnol Sebastián de Benalcázar le 6 décembre 1534. Au début du XVIe siècle, la ville adopta un style monumental, suite à la construction de plusieurs missions catholiques, d'églises et cathédrale. En 1822 le général Antonio José de Sucre proclama l'indépendance de l'Équateur. Quito devint alors le principal centre économique du pays jusqu'au début du XXe siècle, où elle fut supplantée par Guayaquil.
La ville s'étend du nord au sud sur 20 km de longueur, à une altitude de 2 850 m, sur les flancs du volcan Guagua Pichincha qui entra en éruption en 1999. Le volcan Cotopaxi, culminant à 5 897 m, situé à 60 km au sud de Quito, a connu sa dernière grande éruption en 1877 lorsqu'il détruisit plusieurs villes et vallées. La ville a également connu plusieurs tremblements de terre.

Le bassin

La cuvette de Quito forme la partie haute du bassin du Guayllabamba. Le rio Guayllabamba rejoint le rio Blanco pour former le rio Esmeraldas dont l'embouchure sur l'océan Pacifique est situé au nord de l'Equateur. Le bassin du rio Esmeraldas a une superficie de 21 700 km^2. Le haut bassin du Guayllabamba a une superficie d'environ 4 700 km^2 avant son embouchure avec l'Intag à une altitude de 1000 m (Figure 1).

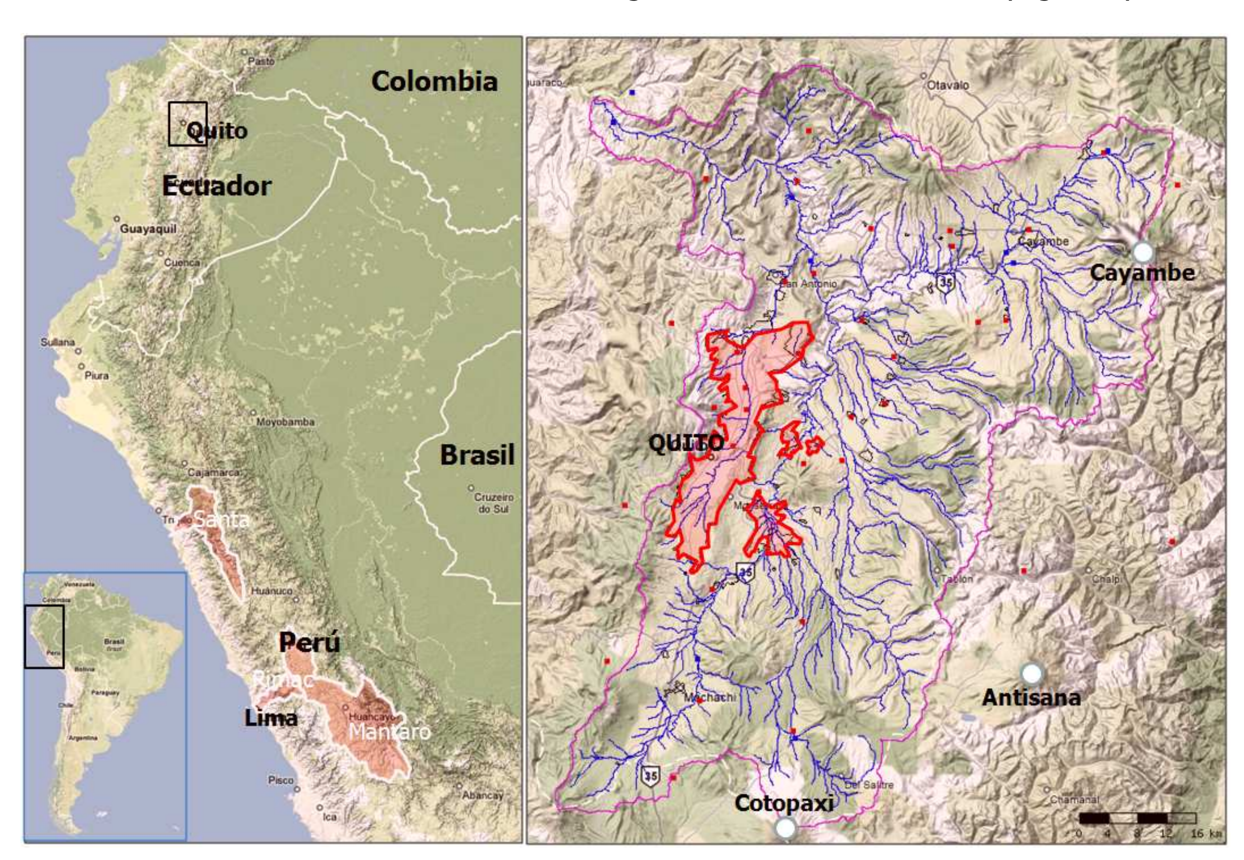


Figure 1. *Cordillère des Andes et bassin de Quito (sources : Google Maps ; Mafla, 2007)*

Le bassin de Quito est une des régions la plus densément peuplée des Andes. La population du District Métropolitain de Quito qui compte environ 2,5 millions d'habitants en 2007, a été multipliée par 7 depuis 1950 et continue de s'accroître à un rythme rapide (Figure 2, De Bievre *et al.*, 2007). Ce taux de croissance induit une grande demande de services basiques comme l'eau potable, l'électricité et les produits dérivés de l'agro-industrie. Cette évolution rapide conduit également à une transformation de l'usage du sol, d'agricole à urbain (Lloret, 2005). Les principales demandes en eau dans le bassin sont constituées par l'eau potable, les industries, la génération hydro-électrique et l'irrigation. Le déséquilibre entre offre et demande et les problèmes de pollution ont conduit à des transferts interbassins, spécialement depuis le versant amazonien.

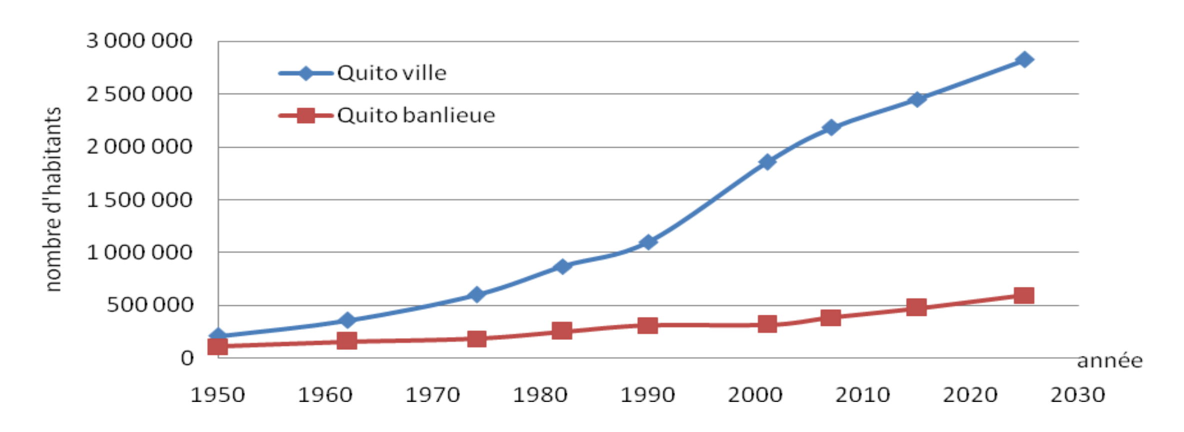


Figure 2. *Croissance de la population du DMQ de 1950 à 2007 avec projection jusqu'en 2025 (Source : Instituto Nacional de Estadística y Censos 2001; De Bievre et al., 2007)*

Eau potable

Ainsi pour l'adduction en eau potable du District Métropolitain de Quito (DMQ), le tableau 1, présenté plus loin et tiré de Ayabaca (2006), détaille les différentes offres du DMQ pour l'année 2005, qui représentent un débit d'environ 7.2 m^3/s. Les puits permettent de mobiliser moins de 0.3 m^3/s, soit moins de 4% de l'offre totale. La part de mobilisation de bassins du versant amazonien, dont les travaux ont été réalisés durant la dernière décennie, s'élève à 63%, avec une offre de 4.5 m^3/s : 3 m^3/s provenant du système Papallacta, dont 1.4 m^3/s de la ramification nord avec le réservoir Salve Faccha (bassin Oyacachi), et 1.5 m^3/s du système La Mica à partir de l'Antisana (Figure 6).

L'EMAAP-Q est l'entreprise métropolitaine responsable de l'eau potable et de l'assainissement de Quito. Le district métropolitain de Quito a récemment délégué à l'EMAAP-Q toutes les activités opérationnelles qu'impliquent la gestion du milieu, la gestion des bassins hydrographiques, la décontamination et la conservation des ressources en eau. L'EMAAP-Q prévoit de grands aménagements, détaillés plus loin, présentés comme la seule alternative, dès 2015, pour faire face à la croissance de la population sur le DMQ. Ce projet vise à capter et réguler 31 cours d'eau du versant amazonien, où l'EMAAP-Q a obtenu une concession de prise de 17 m^3/s.

Ce développement est remis en cause par certains qui pointent : (a) les problèmes d'atteinte possible à des écosystèmes jusqu'alors préservés (paramos de la bioréserve du Condor, dans le Parc National Cotopaxi et dans les Réserves Ecologiques Cayambe Coca et Antisana), (b) les déséquilibres dans l'économie locale avec des déplacements désordonnés d'activités agricoles, (c) l'absence de structures institutionnelles pour faciliter la résolution de conflits sur les droits d'eau, (d) la nécessité d'études (Lloret, 2005). En effet, si la demande en eau potable est relativement bien connue et bien localisée, elle ne constituerait en 2007 qu'environ 17 % des demandes consommatrices sur le bassin, 13 % correspondant à de l'eau industrielle (De Bievre & Coello, 2007). Donc 70% de la demande correspondrait à de l'eau d'irrigation.

Historique des systèmes irrigués

Or, l'irrigation, fruit d'une histoire ancienne qui a conduit à la superposition de divers types d'aménagements, fait l'objet de nombre d'incertitudes et de nécessité d'études.

Des archives, liées à l'administration coloniale à la fin du XVIème siècle, attestent l'existence de nombreuses "acequias" (canaux d'irrigation). A cette époque, les colons espagnols accaparent les meilleures terres et le processus de légalisation de ces terres repousse les populations indigènes vers les zones d'altitude. La plupart des systèmes actuels ont été construits entre le XVII et XIXème siècle, lorsque les grands propriétaires terriens ont pu mobiliser la main d'œuvre indigène pour creuser et entretenir des canaux.

Au XIX et XXème siècle, la répartition foncière et de l'eau génèrent de nombreux conflits : (1) les grandes haciendas commencent à se diviser entre héritiers, ce qui amène la construction de nouveaux canaux ; (2) les groupements paysans, métis et

indigènes, réclament des droits d'eau pour leur implication dans la construction et l'entretien des réseaux ; (3) des droits d'eau sont achetés sous forme variée pour être revendus ou loués aux petits exploitants. L'accroissement démographique et les conflits persistants entraînent une intervention de l'état. Le gouvernement militaire crée en 1966 l'Institut Equatorien des Ressources Hydriques (INERHI) et nationalise l'ensemble des ressources en eau en 1972. D'une part l'INERHI étudie, construit et gère des grands périmètres irrigués publics (500 à 10 000 ha), dont les exploitants agricoles payent une redevance. D'autre part, l'INERHI contrôle et attribue les concessions (renouvelables tous les 10 ans). Il légalise ainsi des droits d'eau anciens sur les périmètres d'irrigation privée ou traditionnelle, périmètres souvent dispersés et aux caractéristiques rustiques. L'inventaire des droits d'eau, des infrastructures d'accès, de transport et de répartition de l'eau ainsi que la localisation et la caractérisation des périmètres irrigués ont été réalisé par l'ORSTOM/IRD au cours des années 1986-92 dans le cadre du projet FITADE (Le Goulven & Ruf, 1992).

Dans le cas du haut bassin du Guayllabamba, cette étude a inventorié environ 140 000 ha de périmètres irrigués, dont 7 périmètres publics couvrant 62 600 ha, soit 45% de la totalité, et 77 400 périmètres privés répartis en 29 Zones d'Analyse et Recommandations pour l'Irrigation (ZARI). Les bases de données correspondantes ont été transférées sur Système d'Information Géographique. La Figure 3 permet de visualiser la complexité des systèmes. Il est important de noter que, vu l'absence d'actualisation sérieuse, ces surfaces sont encore considérées pour évaluer les dérivations en eau d'irrigation en prenant en compte une répartition mensuelle moyenne de la dotation par hectare (De Bievre & Coello, 2007). Cette estimation conduit à un débit fictif continu de 39 m^3/s, avec un pic très marqué en juillet, correspondant à 84 m^3/s. Si l'implantation des infrastructures a certainement peu changé, les cultures ont certainement beaucoup évolué. Un enjeu important réside dans la caractérisation et l'analyse typologique des pratiques d'irrigation et l'étude des valorisations économiques et sociales de l'eau pour les différents types représentatifs (systèmes traditionnels, floriculture), pour tester différents outils de gestion par la demande.

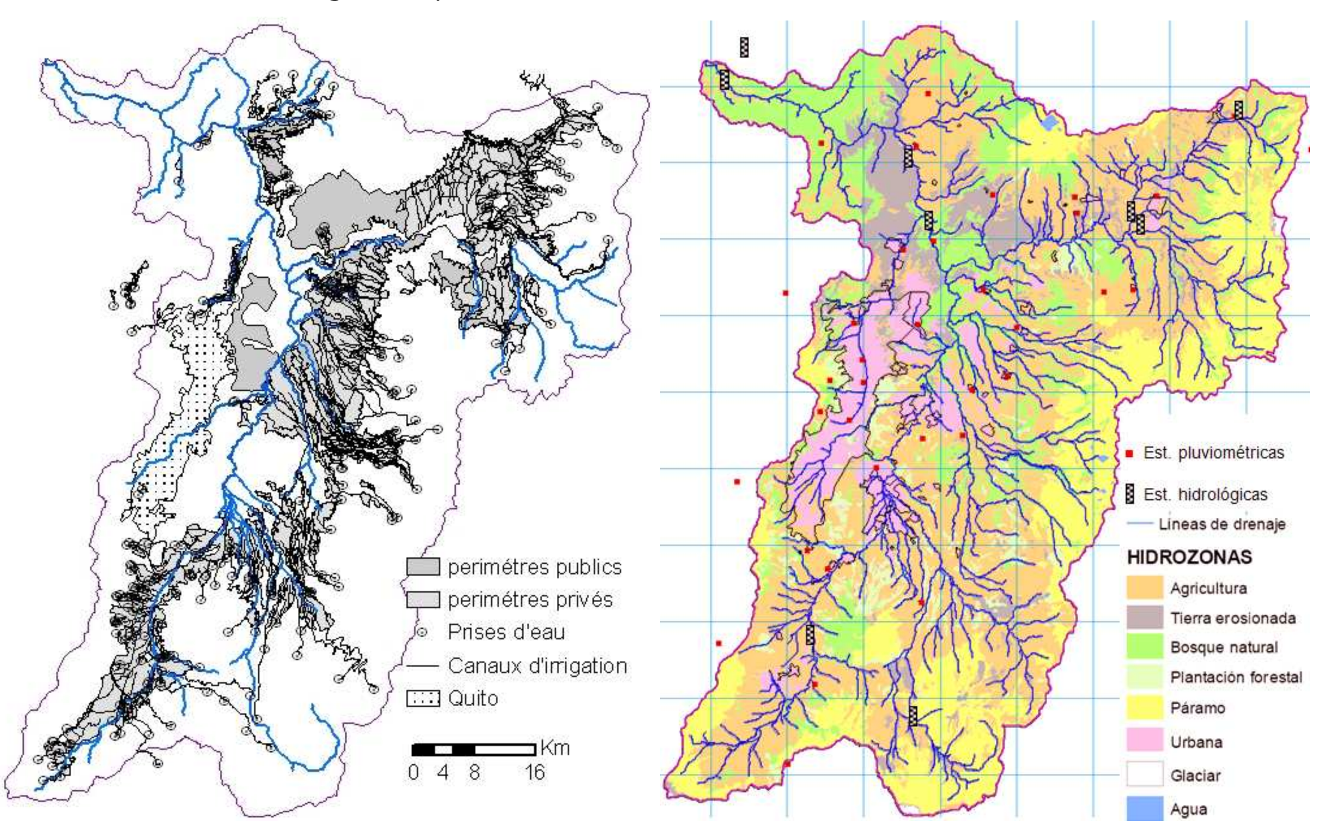


Figure 3. *Les systèmes irrigués publics et privés (Source : ORSTOM, 1992)*

Figure 4. *Stations hydro-pluvio. et zones hydrologiques (De Bievre et al., 2008)*

Institutions actuelles et évolution

Le Conseil National des Ressources en Eau (CNRH) a été fondé en 1994, suite au démantèlement de l'INERHI. Le Secrétariat Général du CNRH est l'organisme chargé de réguler, administrer, planifier et contrôler les ressources en eau. Le CNRH est notamment chargé de l'administration des concessions d'eau via 11 agences de l'eau au niveau national. Mais l'analyse des 7097 concessions de l'agence de l'eau de Quito met en évidence une base avec des données peu fiables, non validées sur le terrain, avec plus de la moitié des concessions non localisées (De Bievre & Coello, 2007). Il est également souligné le travail nécessaire de critique et de mise à jour des données de pluie et d'écoulement gérées au niveau national par l'Institut National de Météorologie et d'Hydrologie (INAMHI).

Suite aux dernières élections présidentielles de 2006, il y a une volonté de réorganiser la gestion de l'eau en Equateur. Les textes sont ainsi actuellement débattus au parlement pour leur intégration dans la nouvelle constitution. Il devrait y avoir création d'un secrétariat national de l'eau et mise en place d'une gestion par bassins hydrographiques.

Pour le District Métropolitain de Quito, il a été créé en 2000 le Fond pour la protection de l'Eau - FONAG qui est un fidéicommis mis en place pour réaliser des projets relatifs à la préservation des bassins hydrographiques qui alimentent Quito. C'est une structure alimentée par la contribution d'adhérents fidélisés sur 80 ans (le principal est l'EMAAP-Q qui verse 1% des ventes d'eau potable) et qui permet d'affecter les rendements du capital au financement d'activités de conservation et d'entretien des sources d'eau alimentant le DMQ et ses environs. Le FONAG, conformément à son mandat de création et en accord avec ce qui est stipulé dans le Décret Métropolitain du 23 avril 2007, propose un processus de changement dans la façon de voir et organiser le développement dans le bassin de Quito. Ce processus vise à considérer comme référence, la connaissance des limitations et des potentialités des ressources en eau, afin d'apporter un critère environnemental intégral pour évaluer les alternatives d'approvisionnement d'eau pour les centres urbains et productifs de la zone.

Le FONAG veut allier une vision institutionnelle et technique. Il gère ainsi depuis 2007 deux projets : (1) *Gouvernance pour assurer à long terme la provision d'eau dans le bassin de Quito*, qui vise à développer une gestion participative ; (2) *Gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin de Quito* (*GIRH-HQ*), dont l'objectif principal est d'offrir des outils pour la négociation à l'organisme de gestion de bassin.

Dans le cadre de ce 2ème projet financé par la Banque Interaméricaine de Développement (BID), il a été développé et mis en service un prototype de portail de Système d'Information des Ressources en Eau de Quito (SIRH-HQ), qui devrait permettre le partage de bases de données des différentes institutions impliquées, avec un degré de détail et de diffusion à la discrétion de chaque institution (Figure 5 ; Mafla, 2007).

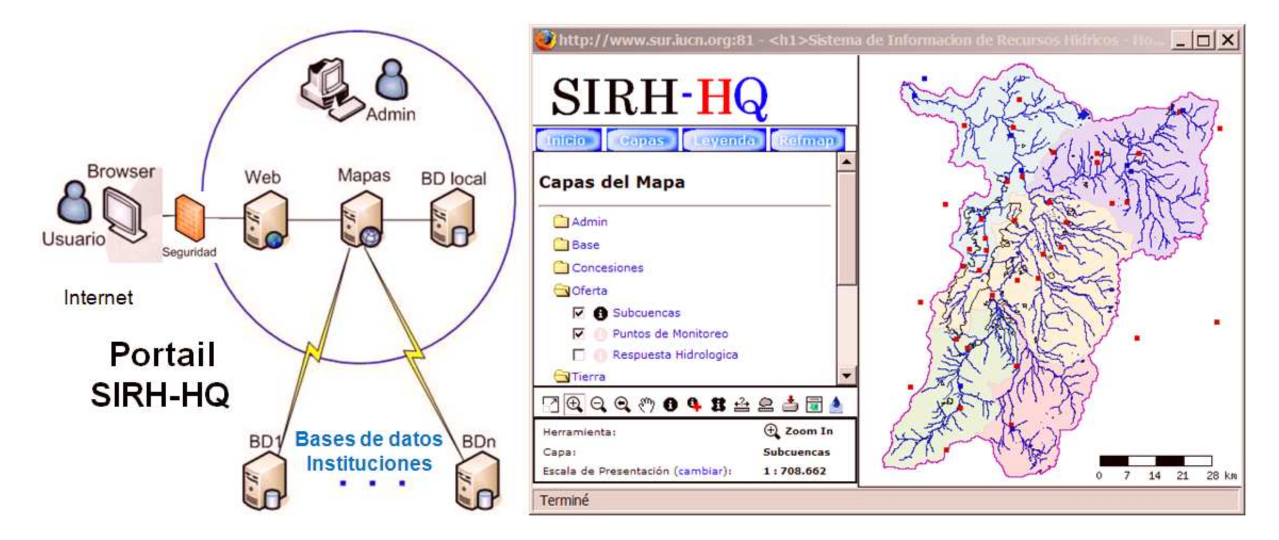
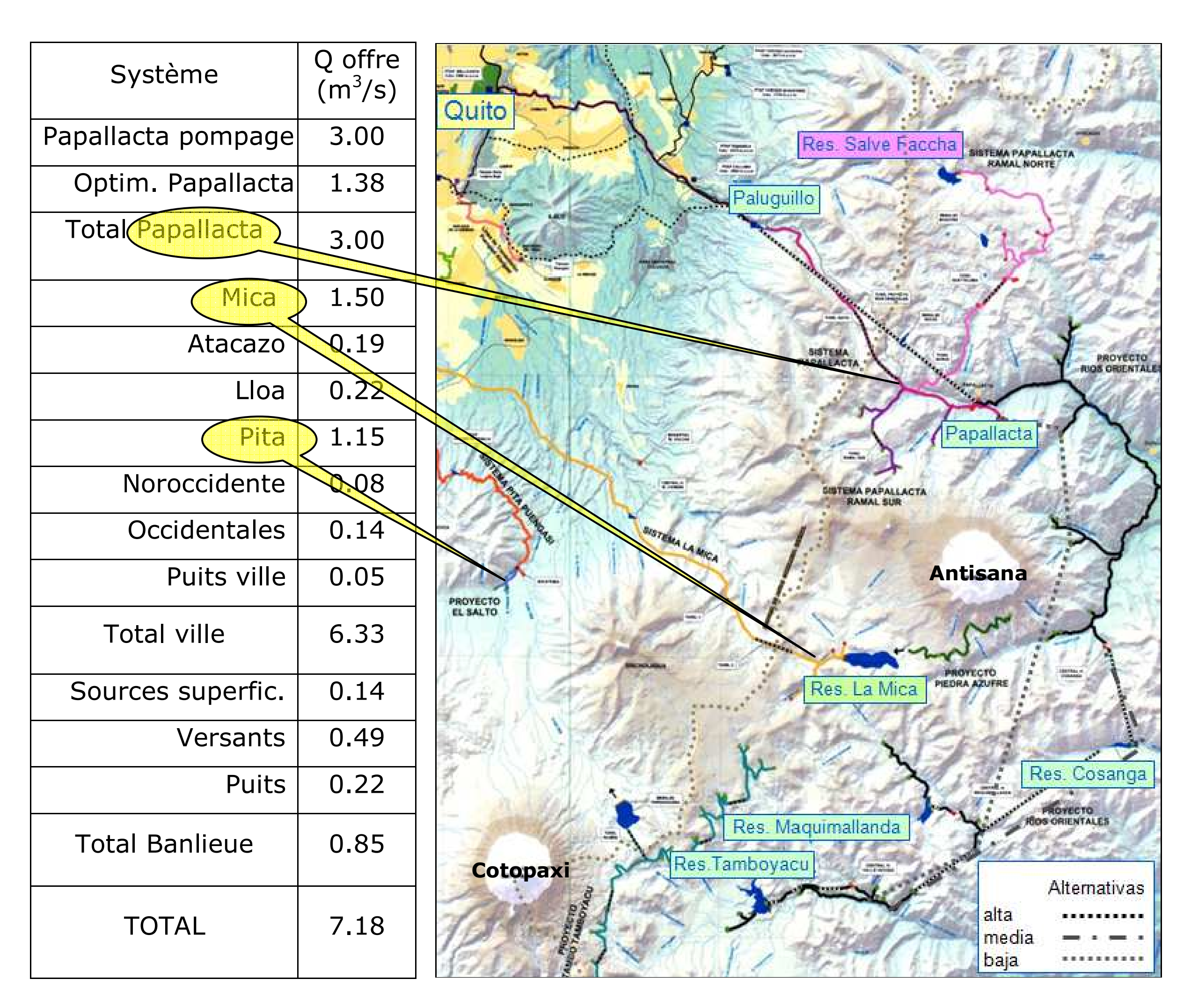


Figure 5. *Principe et prototype du portail du Système d'Information des Ressources en Eau de la Hoya de Quito (Sources : Mafla, 2007 ; www.sur.iucn.org/sirh-hq)*

Dans ce projet *GIRH-HQ*, il a été effectué une caractérisation de l'offre et de la demande en eau sur le haut bassin du Guayllabamba qui souligne les carences en termes d'informations : manque de connaissance de la variabilité spatiale de la pluie, en particulier sur les zones de Páramos ; séries hydrologiques insuffisantes ; données de concessions défaillantes ; non connaissance des consommations réelles industrielles et surtout d'irrigation (De Bievre *et al.*, 2007, 2008). Un modèle hydrologique conceptuel, semi-distribué, déterministe, très simple a été élaboré sous *ArcGIS* à partir de l'identification des différences de réponses de zones hydrologiques (Figure 4) afin de quantifier l'offre en eau mensuelle moyenne interannuelle en n'importe quel point du réseau hydrologique. Ce modèle est utilisé afin de réaliser des diagnostics entre offre et demande pour divers scénarios prospectifs (De Bievre *et al.*, 2008).

LES GRANDS AMENAGEMENTS PREVUS

Le Projet Rios Orientales (PRO, Figure 6), qui est dans la phase fin d'études de préfaisabilité, est présenté par l'EMAAP-Q (Ayabaca, 2006) comme la seule alternative dès 2015 pour faire face à l'augmentation de la population. Le PRO vise à capter et réguler 31 cours d'eau du versant amazonien, où l'EMAAP-Q a obtenu une concession de 17 m^3/s au-dessus de 3100 m d'altitude, concession ratifiée en février 2006 par le conseil de l'eau du CNRH. Le tableau 1 (Ayabaca, 2006), présente les ressources en eau déjà mobilisées par le DMQ en 2005.



Système	Q offre (m^3/s)
Papallacta pompage	3.00
Optim. Papallacta	1.38
Total Papallacta	3.00
Mica	1.50
Atacazo	0.19
Lloa	0.22
Pita	1.15
Noroccidente	0.08
Occidentales	0.14
Puits ville	0.05
Total ville	6.33
Sources superfic.	0.14
Versants	0.49
Puits	0.22
Total Banlieue	0.85
TOTAL	7.18

Tableau 1. *Offres DMQ 2005 (Ayabaca 2006)*

Figure 6. *Partie du système d'alimentation de Quito et alternatives du Projet Rios Orientales (Ayabaca 2006)*

Le graphique offre-demande projeté jusqu'en 2055 (Figure 7 ; Ayabaca, 2006) considère un débit de demande moyen d'environ 285 l/hab/jour et un débit maximum journalier d'environ 370 l/hab/jour (le rapport Qmax / Qmoyen est de 1,3). Ce graphique présente les nouveaux projets les plus probables, avec :

(1) de 2010 à 2014, augmentation du pompage depuis Papallacta de 1.38 à 3 m^3/s, le débit transitant par le tunnel existant passant à 4.81 m^3/s, avec les ramifications nord et sud ;

(2) en 2015, entrée prévue du PRO, avec le nouveau tunnel transcordillère, avec un débit initial de 4.63 m^3/s, qui permet de suspendre les pompages depuis Papallacta et de nombreux puits.

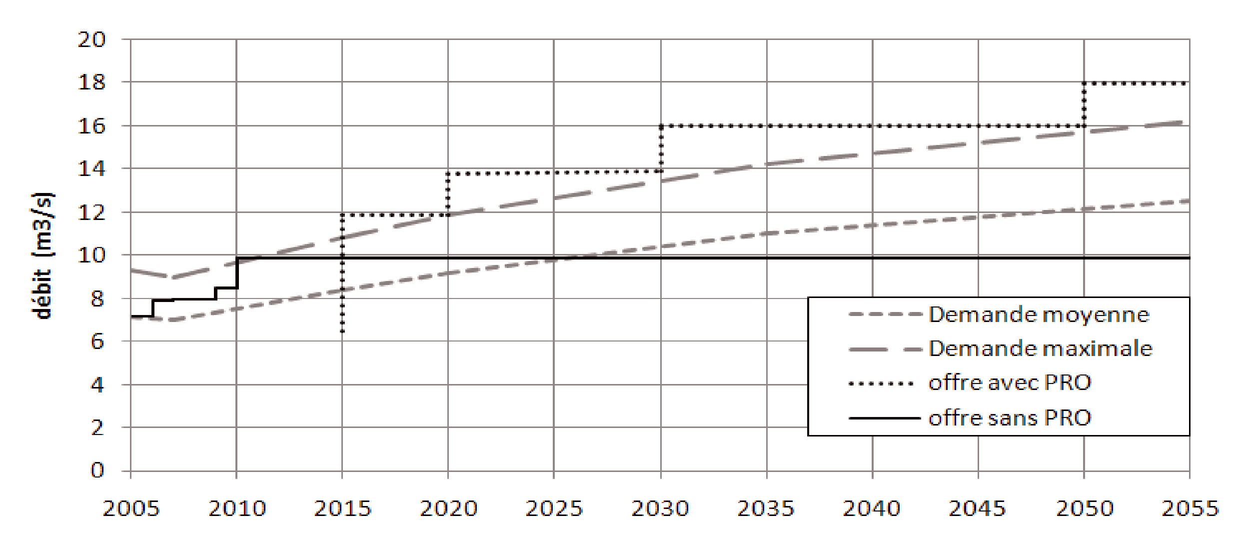


Figure 7. *Croissance demande et offre en eau potable sur le DMQ (Ayabaca, 2006)*

Les principaux ouvrages du PRO, présentés sur la Figure 6, sont constitués par :

(1) 3 réservoirs de régulation multi-annuelle d'environ 60 $M.m^3$ de volume utile et de nombreux captages d'altitude afin d'assurer une desserte gravitaire ;

(2) plus de 90 km de conduites et tunnels d'amenée des captages à la station de traitement principale, dont 20 km de tunnel transcordillère ;

(3) plus de 33 km de conduites de transmission jusqu'aux points d'adduction de Quito et des autres communes à desservir ;

(4) la construction de centrales hydro-électriques afin d'augmenter la production électrique d'Equateur et d'assurer l'équilibre financier du projet.

Selon les études de préfaisabilité, le coût total du projet varie de 630 à 1090 M.$ US. Ce coût dépend d'alternatives considérées pour les niveaux de captage et leurs conséquences sur le dimensionnement des réservoirs, des conduites et tunnels d'amenée. Trois alternatives sont présentées (Figure 6 ; Ayabaca, 2006) :

(1) L'alternative haute, qui doit son nom au fait de capter les cours d'eau le plus haut possible (3420 m d'altitude), afin de pouvoir alimenter le réservoir de Cosanga. Il est considéré un volume utile pour les 3 réservoirs (Tamboyacu, Maquimallanda et Cosanga) de 58 $M.m^3$.

(2) L'alternative moyenne, qui capterait les cours d'eau de la partie supérieure 100 m plus bas (3320 m d'altitude), et donc ne permettrait pas le stockage de Cosanga et demanderait un volume utile des 2 réservoirs (Tamboyacu, Maquimallanda) de 60 $M.m^3$.

(3) L'alternative basse, avec des captages principaux 100 m plus bas (3220 m d'altitude). Le nombre des captages serait réduit à 18 (au lieu de 27) et impliquerait un volume de régulation utile des 2 réservoirs (Tamboyacu, Maquimallanda) de l'ordre de 80 $M.m^3$. Cette alternative se caractérise par l'utilisation quasi exclusive de tunnels, avec un tracé d'amenée moins long.

Sans les réservoirs, et en considérant des débits écologiques estimés à 10% des débits moyens, le débit garanti 95% du temps ne pourrait excéder 10 m^3/s (Ayabaca, 2006).
Des experts de la Banque Mondiale ont estimé que, sans l'apport des glaciers, en raison du changement climatique, il conviendrait de revoir à la hausse l'investissement du PRO pour les 20 prochaines années de 100 M.$ US (Vergara *et al.*, 2007). Il est clair qu'un des enjeux de la planification est économique, mais les enjeux sociaux et écologiques ne sont pas moins importants. Ainsi sur ces projets, il est sollicité très fortement les ressources d'altitude liées aux páramos, qui sont les habitats de communautés paysannes indiennes historiquement marginalisées et pauvres. Ces projets touchent des páramos situés dans des parcs et des bioréserves, donc des écosystèmes avec une grande biodiversité jusqu'ici préservée.

LES RECHERCHES EN COURS OU PREVUES

Différentes recherches complémentaires sont en cours ou sur le point d'être menées afin de répondre à différents enjeux liés à la planification des ressources en eau.

Débits écologiques des bassins d'altitude

A la demande de l'EMAAP-Q en 2005, il a été initié une étude pour proposer des débits écologiques afin de maintenir la biodiversité des bassins versants d'altitude, notamment dans la zone de Papallacta, déjà fortement sollicitée par des prélèvements. Cette recherche propose d'utiliser des macro invertébrées comme bio indicateurs des milieux aquatiques. Cette étude, unique en son genre pour des zones de haute montagne à cette latitude, passe par des campagnes de prélèvements et le suivi sur plusieurs années de cours d'eau en amont et en aval de prises d'eau et sur des sites de référence encore préservés (Fossati & Calvez, 2006). Une recherche complémentaire est menée en utilisant un dispositif de petits filets à mailles variables, laissées dans les cours d'eau, pour piéger des macro invertébrées et estimer la consommation de biomasse, ce dispositif donnant des indications plus intégratrices dans le temps (Dangles *et al.*, 2001). Cette prise en compte de la qualité et de la durabilité environnementale dans la planification est un sujet de recherche en plein essor (Yurdusev & O'Connell, 2005).

Dynamiques d'écoulements en contexte glacio-pluvio-nival

Un enjeu important pour la planification est une meilleure évaluation des dynamiques des ressources en eau d'altitude et de leurs évolutions probables dans un contexte de changement climatique. Sans pouvoir trancher sur l'origine anthropique de ce changement, les glaciers sont des très bons indicateurs des tendances climatiques. La Figure 8 montre ainsi très clairement la diminution des glaciers andins, dont l'Antisana, sur les 50 dernières années (Francou & Vincent, 2007).

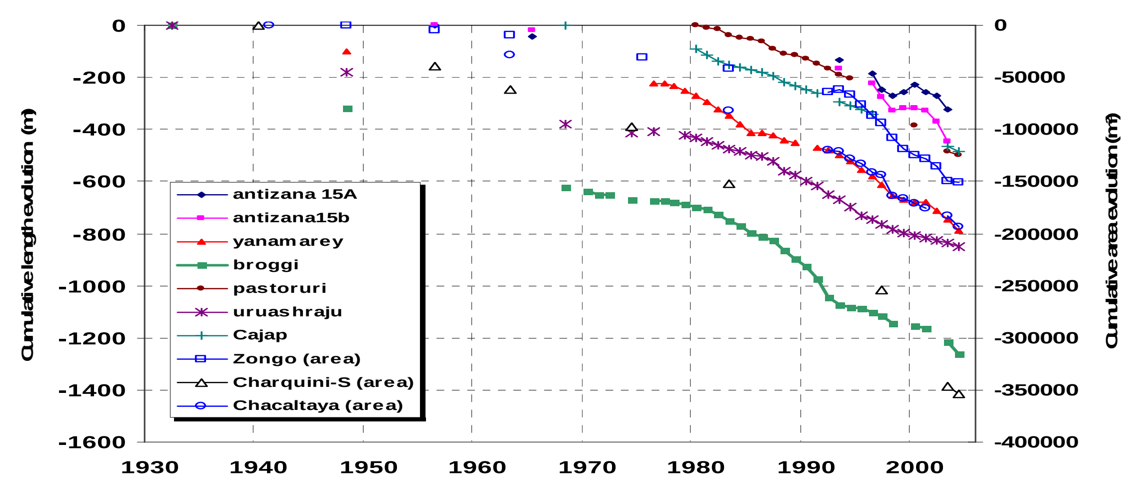


Figure 8. *Evolution de la longueur ou de la surface de dix glaciers en Equateur (Antizana 15a and 15b), au Pérou (Yanamarey, Broggi, Pastoruri, Urushraju, Cajap) en Bolivie (Zongo, Charquini, Chacaltaya) entre 1930 et 2005. (Francou & Vincent, 2007).*

Dans sa thèse sur le cas du volcan Antisana, Villacis (2008) a pu estimer l'importance de l'apport glaciaire sur des bassins partiellement englacés situés au dessus de 4000 m d'altitude en utilisant des mesures hydro, glacio et météorologiques encore inexploitées (1999-2007). Des modèles conceptuels ou statistiques de simulation des débits de fonte ont permis de mettre en évidence sur la période 2005-2006 le rôle du facteur température, mais aussi celui du vent dont la force et la direction sont reliées aux flux d'humidité et influent aussi sur la sublimation. Si les conditions climatiques actuelles se maintiennent, d'autres modèles montrent que, après une augmentation des débits due au rapide recul actuel des glaciers : i) dans l'hypothèse du scénario A2 pessimiste du GIEC (réchauffement de +5,7°C en 100 ans), l'apport glaciaire diminuera et disparaîtra en 60 ans, alors que ii) dans l'hypothèse du scénario moins pessimiste B1 (+1,8°C en 100 ans), cette disparition aurait lieu après 140 ans (Villacis, 2008).
Ces résultats ne sont pas aussi catastrophiques que ceux évoqués dans Vergara *et al.* (2007) et confirment qu'il y a nécessité d'intensifier les recherches et les mesures afin de mieux évaluer le rôle des dynamiques des glaciers sur les écoulements (Bradley *et al.*, 2006). Des études en ce sens ont été menées notamment par les travaux de Pouyaud *et al.* (2005), Juen *et al.* (2007), Suarez *et al.* (2008) sur la Cordillère Blanche. Notre équipe IRD vient d'être associée, en avril 2008, avec le Stockholm Environment Institute (SEI) sur le projet Banque Mondiale "*Assessing the Impacts of Climate Change on Mountain Hydrology : Development of a Methodology through a Case Study in Peru*" afin de proposer une modélisation adaptée pour les écoulements glaciaires et les páramos qui permettra de tester différentes hypothèses de changements climatiques. Cette modélisation sera calée et validée sur 3 bassins du Pérou (Santa, Rimac et Mantaro ; Figure 1) et sera testée ultérieurement sur les bassins d'altitude de la région de Quito.
Il a été souligné pour ces bassins le rôle régulateur très important des páramos et le manque d'informations hydrologiques de base (De Bievre *et al.*, 2007). Des campagnes de mesures ont été initiées avec L'EMAAP-Q et vont être intensifiées sur des bassins pilotes. Il sera également testé une modélisation hydrologique à base géomorphologique, qui a donné des résultats intéressants pour des transpositions sur des bassins avec pas ou peu de données hydrologiques (Cudennec *et al.*, 2007).

Dynamiques d'évolutions urbaines et agricoles

Il a été souligné précédemment la forte croissance socio-économique de la région de Quito et le manque de connaissance des consommations réelles liées à l'irrigation, qui constituerait pourtant 70% des demandes consommatrices du haut bassin de Guayllabamba (De Bievre & Coello, 2007).
L'inventaire des droits d'eau, des infrastructures d'accès, de transport et de répartition de l'eau ainsi que la localisation et la caractérisation des périmètres irrigués ont été réalisé par l'ORSTOM/IRD pour l'année 1992 (Le Goulven & Ruf, 1992). A partir de cet état, les dynamiques d'évolution urbaines et agricoles vont pouvoir être étudiées sur ces 15 dernières années, en exploitant notamment les couvertures d'usages des sols réalisées sur tout le bassin, par *The Nature Conservancy-TNC*, pour les années 1998 et 2007 (Mafla, 2007). Il est intéressant d'analyser les fronts d'urbanisation pour comprendre comment les zones périurbaines vont s'intégrer dans le réseau officiel AEP, comment les droits d'eau qui sont liés à un usage agricole vont être transformés ou non en droits urbains. L'implantation du nouvel aéroport dans la vallée à l'horizon 2010 pourrait ainsi créer de profonds changements.
Les études vont également porter sur la représentation socio-économique des activités agricoles dans le bassin, à partir de l'établissement de typologies d'exploitations agricoles et des ateliers de production, et sur des tests de scénarios d'évolutions pluriannuelles de ces activités. Une perspective de recherche intéressante consiste à proposer une modélisation de la demande en eau agricole sur des bases biophysiques et socio-économiques, modélisation qui pourrait être capitalisée dans l'évolution de l'environnement de modélisation ZonAgri (Pouget *et al.*, 2006) et permettrait de tester différents outils de gestion par la demande.

Allocation et planification des ressources en eau

Les recherches sur les modèles d'aide à la planification vont porter sur la conception de tests de scénarios d'évolution, pertinents en termes de variabilité hydrologique, avec les effets du changement climatique, et d'évolutions socio-économiques et écologiques.

En effet, dans les modèles classiques d'allocation des ressources, les tests portent sur des alternatives des systèmes étudiés où sont fixés des états d'aménagements et des règles de gestion. Les états d'aménagements sont représentés par la construction interactive des schémas topologiques des systèmes étudiés sous forme de réseaux hydrauliques constitués de nœuds et d'arcs (Pouget *et al.*, 2006). Généralement, ces modèles permettent de simuler le fonctionnement d'un système par l'application de consignes de gestion sur de longues séries temporelles d'apports, considérées comme représentatives de la variabilité hydrologique (Wurbs, 2006). L'évaluation des performances d'un état du système et d'un mode de gestion est réalisée par des analyses statistiques des résultats obtenus par rapport aux objectifs. On peut ainsi étudier la fréquence d'apparition de défaillances (fiabilité), l'ampleur des déficits (vulnérabilité) et la durée des pénuries (flexibilité) (Moy *et al.*, 1985 ; Rodding & Rosbjerg, 2004).

Or, dans de nombreux projets, il convient d'étudier des dynamiques d'évolution des systèmes (impacts du changement climatique, urbanisation, stratégies de développement agricole), afin d'évaluer des scénarios de développement et la durabilité environnementale et sociale. Cette étude de scénarios pluriannuels de développement est une des attentes fortes du projet AguAndes-Quito.

Différents environnements de modélisation vont être testés, dont le logiciel WEAP (Water Evaluation and Planning ; Figure 9 ; Yates *et al.*, 2005) qui est axé sur les tests de scénarios d'évolutions pluriannuelles des demandes et de l'offre en eau, mais avec une simulation déterministe des apports en eau. C'est cet environnement, développé par le Stockholm Environment Institute (SEI), qui va également être utilisé dans le projet Banque Mondiale "*Assessing the Impacts of Climate Change on Mountain Hydrology : Development of a Methodology through a Case Study in Peru*".

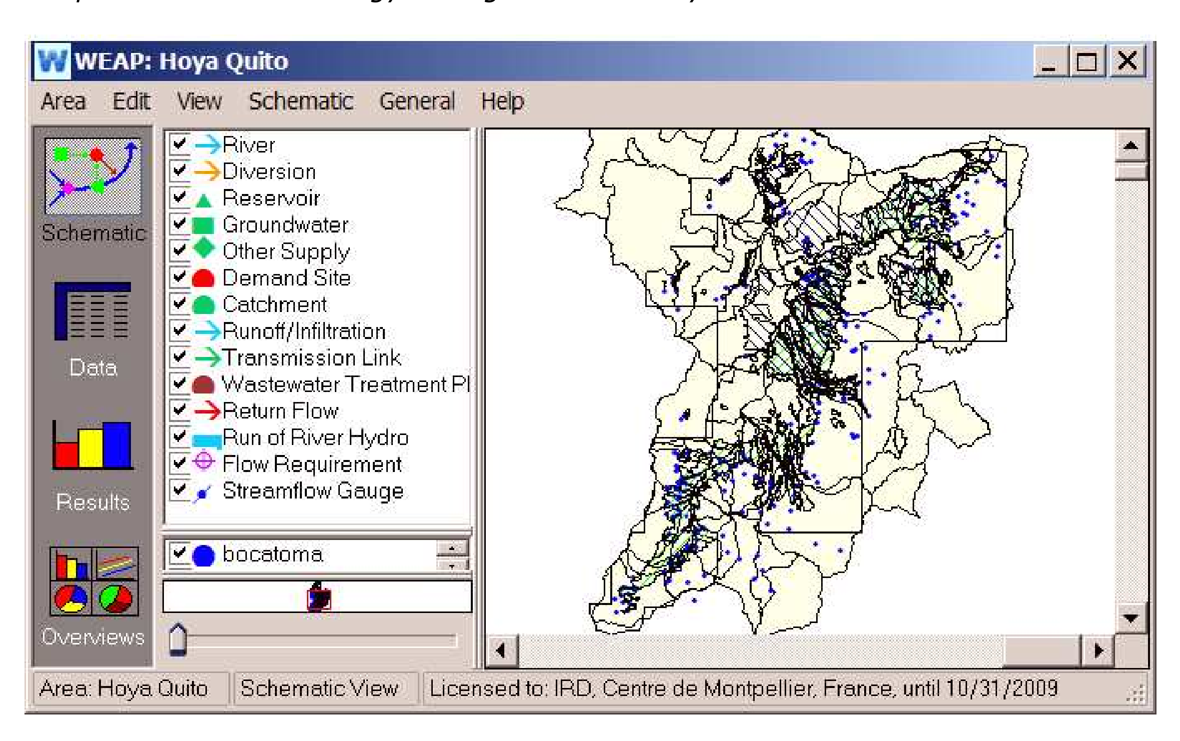


Figure 9. *Utilisation du modèle d'aide à la planification WEAP (Yates et al., 2005).*

De manière parallèle, il sera testé le logiciel HydPro, nouvelle version en cours de développement de l'environnement d'aide à l'allocation des ressources en eau HyD2002 (Pouget *et al.*, 2006). Cette nouvelle version intégrera les composants spécifiques aux Andes (modèles hydrologiques glaciers et páramos). La déclaration sous forme de logiciel

libre et l'adoption de standards (ex : *open Modelling Interface - openMI* pour l'interopérabilité des modèles ; Gregersen *et al.*, 2005) visent à favoriser l'ouverture des modèles logiciels développés, le travail collaboratif et l'appropriation par nos partenaires du Sud.
Dans un premier temps, ces modèles permettront de représenter les modes d'allocation actuels entre les différents usages, leurs performances et leurs défaillances. Ce calage avec la réalité permettra d'identifier et de localiser les points de conflits et de quantifier les risques de non fourniture. Ces points seront vérifiés sur le terrain avec les usagers concernés, les résultats du modèle étant des éléments illustratifs importants du dialogue.
L'environnement de modélisation proposé sera ensuite utilisé pour simuler l'impact de différents changements : infrastructures hydrauliques, usages et/ou pratiques, règles de priorité, changement climatique, évolutions des pressions anthropiques…
L'intérêt des différents scénarios est avant tout de montrer aux différents acteurs, des gestionnaires aux utilisateurs, les conséquences de tout changement, de les identifier et de les caractériser dans l'espace et dans le temps en termes d'indicateurs de fréquence, durée, intensité. L'environnement de modélisation n'est pas destiné à fournir des modes d'allocation soi-disant optimisés. Il doit avant tout, après différentes simulations, proposer des solutions acceptables aux gestionnaires et acceptées par les usagers.

CONCLUSION

Le projet AguAndes a débuté en Equateur dans un contexte politique de réorganisation de la gestion des ressources en eau, les textes sont ainsi actuellement débattus au parlement pour leur intégration dans la nouvelle constitution. La question de la gestion intégrée de l'eau par bassins est devenue un sujet crucial, avec de fortes attentes en termes de recherche et développement. Notre implication sur la région de Quito constitue un projet pilote important pour l'ensemble de nos partenaires. La formation, aux concepts, méthodes et logiciels d'aide à la gestion intégrée des ressources en eau, de jeunes doctorants qui assureront la continuité des recherches futures est un point fort de la collaboration, validé par nos partenaires. Les recherches portent sur la co-construction de modèles adaptés afin d'évaluer des solutions de développement économiquement viables, socialement acceptables et supportables par l'environnement. Les enjeux dans la planification résident dans la nécessité, l'échéance et l'ampleur d'aménagements de transferts interbassins pour mobiliser des ressources de bonne qualité dans des écosystèmes préservés afin de faire face à une croissance socio-économique pas toujours maîtrisée et qui a entraîné des pollutions importantes dans le bassin d'origine.
Ces enjeux sont largement partagés par les grandes métropoles comme Lima et La Paz, mais aussi nombre d'autres bassins andins qui connaissent une forte croissance socio-économique. Le projet Banque Mondiale "*Assessing the Impacts of Climate Change on Mountain Hydrology : Development of a Methodology through a Case Study in Peru*", qui va associer l'IRD et SEI, porte ainsi sur 3 bassins péruviens : Santa, bassin possédant près d'un tiers des surfaces englacées du Pérou et de gros périmètres irrigués à l'aval sur des bassins limitrophes ; Mantaro, bassin produisant plus de 30 % de l'énergie hydro-électrique du Pérou ; Rimac, bassin en amont de Lima (Figure 1). En collaboration avec le futur Laboratoire Mixte International (LMI) Great-Ice, l'Université Nationale Agronomique La Molina (UNALM) à Lima, l'Ecole Polytechnique Nationale de Quito (EPN), il est d'ores et déjà envisagé un travail commun sur les bassins de Quito, de Lima et La Paz en Bolivie, avec une opportunité d'obtenir de futurs financements GEF.

BIBLIOGRAPHIE

Ayabaca, E., "Agua Potable para el Distrito Metropolitano de Quito hasta el año 2055", Primer congreso internacional de Regulación, Control y Fortalecimiento Institucional en Agua Potable y Saneamiento, 27, 28 et 29 sep. 2006, Ibarra, Ecuador, (2006), 26 p.

Bradley, R.S., Vuille, M., Diaz, H.F., Vergara, W., "Threats to water supplies in the Tropical Andes". Science, 312, 5781, (2006), pp. 1755-1756

CNRH, Consejo Nacional de Recursos Hidricos, "Los recursos hidricos en Ecuador", Recopilacion de informacion basica, CD interactivo, (2007)

Cudennec.C., Pouget J.C., Bousquet F., Laumond C., Rolland D., "Combined spatial, topological and scaling analysis of river basin hydro-geomorphometry: the HydroStruct application within the OdefiX generic Java framework", Proc. 7th International Conference on Hydroinformatics, 4-8 sep. 2006, Nice, Vol.III, p. 2173-2180.

Dangles, O., Guérold, F. & Usséglio-Polatera, Ph., "Role of drifted particulate organic matter in the macroinvertebrate colonization patterns of leaf bags in headwater streams". Freshwater Biology 46:, (2001), pp. 1-12

De Bievre, B., Coello, X., "Caracterización de la demanda hídrica", Proyecto Manejo Integrado de los Recursos Hidricos en la Hoya de Quito, UICN-Sur, Ecuador, ago. 2007, 33 p.

De Bievre, B., Coello, X., De Keizer, O., Maljaars, P., "Modelo hidrológico de la hoya de Quito", Proyecto Manejo Integrado de los Recursos Hidricos en la Hoya de Quito, UICN-Sur, Ecuador, feb. 2008, 31 p.

De Bievre, B., Coello, X., Maljaars, P., "Diagnostico del balance entre oferta y demanda hídrica", Proyecto Manejo Integrado de los Recursos Hidricos en la Hoya de Quito, UICN-Sur, Ecuador, feb. 2008, 16 p.

Fossati O., Calvez R., 2006. Requerimientos cientificos para caudales ecologicos en rios del sistema Papallacta, Ecuador, Rapport IRD, Montpellier, 10-juil-2006, 22 p.

Francou, B. & Vincent, C., "Les glaciers à l'épreuve du climat", coédition IRD / Belin, ISBN 9782701146416, (2007), 276 p.

Girard, S., "Les páramos, espace stratégique pour la gestion de l'eau dans les Andes septentrionales: le bassin-versant du río Ambato (Équateur)", M@ppemonde 78, (2005), 12 p.

Gregersen, J.B., Gijsbers, P.J.A., Western, S.J.P., Blind, M., "OpenMI: the essential concepts and their implications for legacy software", Advances in Geosciences, 4, (2005), pp. 37-44

Juen, I., Kaser, G., Georges, C., "Modelling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (Cordillera Blanca, Perú)", Global and Planetary Change 59 (2007), pp. 37–48

Le Bars, M., Allaya, M., Le Grusse, P., Attonaty, J.M., "OLYMPE, Manuel d'utilisation", CIHEAM-IAMM editions, ISBN: 2-85352-305-5, (2005), 120 pp

Le Goulven, P. & Ruf, T., "L'eau et sa gestion dans la planification de l'irrigation traditionnelle des Andes équatoriennes", In P. Carré (dir.), Usage agricole de l'eau. Journées hydrologiques ORSTOM, (1992), pp. 201-224

Lloret, P., "Un fidéicommis comme instrument financier pour la conservation et la protection de l'eau, le cas du Fonds pour l'eau de Quito, Equateur", Conférence FAO/Pays-Bas sur "L'eau pour l'alimentation et les écosystèmes : Pour une action concrète !", (2005), 3 p.

Mafla, E., "Evaluación de los Requerimientos para el Sistema de Información sobre Recursos Hídricos", Proyecto Manejo Integrado de los Recursos Hidricos en la Hoya de Quito, UICN-Sur, Ecuador, ago. 2007, 25 p.

Moy, W-S., Cohon, J.L., Revelle, C.S., "A Programming Model for Analysis of the Reliability, Resilience, and Vulnerability of a Water Supply Reservoir". Water Resources Research, Vol. 22, NO. 4, (1986), pp. 489-498

Pouget, J.C., Bousquet, F., Le Goulven, P., Quaranta, D., Rebatel, J.C., Rolland, D., "OdefiX java framework for developing and interfacing hydrological and water management models - Generic components and application for water resources

allocation". Proc. 7th International Conference on Hydroinformatics", 4-8 sep. 2006, Nice, Vol.III, (2006), p. 2348-2355.

Pouget, J.C., Poussin, J.C., Pettinotti, B., Quaranta, D., Rolland, D., "Regional and prospective analysis of agricultural activities and water demands: the ZonAgri modelling environment within the OdefiX generic Java framework", Proc. 7th International Conference on Hydroinformatics, 4-8 sep. 2006, Nice, Vol.IV, p. 2563-2570.

Pouyaud, B., Zapata, M., Yerren, J., Gomez, J., Rosas, G., Suarez, W., Ribstein, P., "Devenir des ressources en eau glaciaire de la Cordillère Blanche". Hydrological Sciences Journal 50(6), (2005), pp. 999–1021

Rodding Kjeldsen, T., Rosbjerg, D., "Choice of reliability, resilience and vulnerabibilty estimators for risk assessments of water resources systems". Hydrological Sciences Journal 49(5), (2004), pp. 755-767

Suarez, W., Chevallier, P., Pouyaud, B., Lopez, P., "Hydrological and hydraulic balance of Parón lake (White cordillera, Peru)". Hydrological Sciences Journal 53(1), (2008), pp. 266-277

Vergara, W., Deeb, A. M. , Valencia, A. M., Bradley, R. S., Francou, B., Zarzar, A., Grünwaldt, A., Haeussling, S. M., "Economic Impacts of Rapid Glacier Retreat in the Andes", *Eos Trans. AGU*, 88(25), (2007), 261

Villacis, M., "Ressources en eau glaciaire dans les Andes d'Equateur en relation avec les variations du climat : Cas du volcan Antisana", Thèse Université Montpellier 2, (2008), 219 p.

Wurbs, R.A., "Comparative Evaluation of Generalized River/Reservoir System Models", TR-282, Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, (2006), http://twri.tamu.edu/reports/2005/tr282.pdf, 199 p.

Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., Hubert-Lee, A., "WEAP21 – A demand-, priority-, and preference-driven, water planning model", Water International, Vol. 30, No. 4, (2005), p. 487-500.

Yurdusev, M. A. & O'Connell, P.E., "Environmentally-Sensitive Water Resources Planning, I-Methodology". Water Resources Management, vol.19, no.4, (2005), pp. 375–397.